

臭氧处理剩余污泥的减量化实验研究

何楚茵^{1,2} 金辉^{1,2*} 卜淳炜¹ 温子成¹ 李贇¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

摘要 采用质子交换聚合物膜电解法(PEM)产生臭氧, 单独对剩余污泥进行氧化破解实验, 结果表明, 随着臭氧化反应时间的增加, 污泥微生物细胞裂解, 胞内物质进入到污泥溶液中, 污泥固体物质减少, 使得TS和VTS均显著下降, 处理40 min后, 其去除率分别达到57.33%和72.76%; SCOD前30 min呈线性增长, 通入臭氧60 min后, 由处理前的3 501.24 mg/L上升到6 298.32 mg/L, 增长率达79.88%; SV_{30} 及滤饼含水率均呈下降趋势, 表明剩余污泥的沉淀性能及脱水性能得到明显改善。实验结果表明, 直接利用臭氧对剩余污泥进行处理, 可获得良好的减量化效果。

关键词 剩余污泥 减量化 臭氧 总固体浓度 挥发性总固体浓度 溶解性COD

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)11-4228-07

Experimental study on performance of ozonation disintegration for excess sludge reduction

He Chuyin^{1,2} Jin Hui^{1,2} Bu Chunwei¹ Wen Zicheng¹ Li Yun¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou 510275, China)

Abstract Continuous experiments in lab scale process were carried out to study the effect of excess sludge ozonation and reduce the cost of sludge reduction. During the treatment process, various parameters characterizing sludge were investigated. A substantial reduction in the volume of sludge was observed. After ozone consumption of 40 minutes, the removal efficiencies of total solid(TS) and volatile total solid (VTS) increased to 57.33% and 72.76%, respectively. Soluble chemical oxygen demand (SCOD) proliferated as a consequence of extending the ozone feeding time in the first 30 minutes, and rose to a final concentration of 6 298.32 mg/L from the original 3 501.24 mg/L, demonstrating a growth rate of 79.88%. A steady decline both in 30 min settled sludge volume (SV_{30}) and water content of sludge cake was observed through ozonation, which suggested that ozonation could improve both of the sedimentation and dewatering performances. These facts suggested a remarkable effect of the sludge reduction by ozonation.

Key words sludge; reduction; ozone; total solid concentration; volatile total solid concentration

城市污水处理厂剩余污泥的处置一直是污水处理领域中的研究热点。臭氧化污泥减量技术, 是利用臭氧的强氧化性分解微生物细胞, 降低污泥产量的一种操作简单、破解效率高的污泥减量技术^[1]。

目前污泥臭氧化处理仍待解决的问题之一为臭氧生产投资相对较大, 因此如何降低其使用成本是值得关注的方面。大部分使用臭氧进行污泥减量化的实验均采用电晕法(空气放电法)来制取臭氧^[1-23]。空气中较低的含氧量从根本上局限了放电法制取高浓度臭氧的可能性(常规下臭氧浓度为3%), 造成当前利用臭氧氧化污泥产生高成本的困境, 而且此方法亦会伴生诱癌物质氮氧化物

(NO_x)。其次, 大部分实验使用活性污泥或回流污泥作为实验材料^[2-23], 污泥经驯化后, 通入臭氧进行氧化, 或将臭氧氧化后的污泥回流至污水处理系统中的曝气池, 使回流污泥与活性污泥充分反应后, 再测定污泥性质和出水水质的相关指标, 而对浓缩脱水后的剩余污泥进行臭氧氧化处理的报道, 则较为少见。

实验采取质子交换聚合物膜电解法(PEM)代

基金项目: 广东省科技厅科技计划项目(2010380004202591)

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2012-06-29

作者简介: 何楚茵(1987~), 女, 硕士研究生, 主要从事水环境修复与规划方面的研究。E-mail: hechuyin@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: eesjh@mail.sysu.edu.cn

替电晕法,使用纯水作为提取物,通过氢氧分离、氧原子聚合,获得高纯度、高浓度的臭氧。常规下臭氧浓度可达 20%。同时,为检验污泥浓度的下降是臭氧处理的结果,抑或仅是处理系统中活性污泥对回流污泥的吞噬作用,实验将臭氧直接作用于浓缩脱水后的剩余污泥,研究臭氧对剩余污泥氧化的减量化效果。

1 实验部分

1.1 实验材料

1.1.1 污泥

剩余污泥取自广州沥滘污水处理厂浓缩脱水后的剩余污泥,该污水处理厂采用改良 A/O 活性污泥处理工艺,处理容量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污泥浓缩脱水采用一体化离心浓缩脱水机,出泥含水率为 75%~78%。

由于各种实验测试指标均须在溶液状态下测定,故实验中每批处理污泥以 1:20 的泥水比稀释成 280~300 mL 的污泥混合液,初始污泥浓度约为 8.85~9.6 g/L。

污泥取样点设在污泥浓缩脱水间,取样后装入敞口塑料桶,立即转移至实验室,并储藏于 4℃ 的冰箱中,留待实验使用。各实验指标均采用 3 个平行组进行测试。

1.1.2 臭氧

臭氧发生器采用武汉康桥环保设备有限公司生产的 ECO-09100 型电解式臭氧发生器,利用电导率 $\leq 5 \text{ uS/cm}$ 的电解母液制备臭氧、氧气混合气体。室温为 25℃ 时,臭氧最大产量为 4.8 g/h,其中出气流体的臭氧浓度为 18%~20%,氧气浓度为 80%~82%,出气流量为 0.2 L/s。

该发生器采用电解水生成臭氧的新型技术,具有生成臭氧浓度高、耗电量小、不需使用纯氧作为原料等的优点。

1.2 实验仪器与装置

1.2.1 实验方法

首先称取一定量的剩余污泥,加水稀释,形成混合液状态,然后倒入臭氧氧化反应器中,通入臭氧进行曝气处理。处理完毕后,从臭氧氧化反应器中取样,分别测定总固体浓度(TS)、挥发性总固体浓度(VTS)、溶解性 COD(SCOD)、沉降性能、滤饼含水率、pH 等各项指标。

1.2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由臭氧发生器、微型气泵及反应器组成。高纯水(电导率为 0)通入 ECO-09100 型电解式臭氧发生器中,通过电解反应释放臭氧,再用微型气泵增压,输送臭氧到臭氧反应器中进行减量处理。反应器为 500 mL 的特氏气体洗瓶,尾气用 KI 溶液吸收。

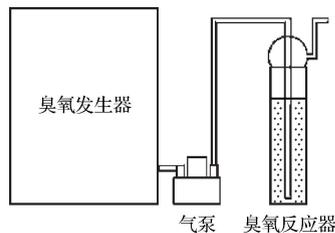


图 1 臭氧氧化剩余污泥实验装置示意图

Fig. 1 Experimental equipment for excess sludge reduction by ozonation

由于发生器本身没有集成气泵,需要额外连接使用气泵或空气压缩机才能将产生的臭氧有效输出到污泥混合液中。本实验中使用的微型气泵流量为 4 L/s。

1.3 分析项目和方法

pH 采用实验室 pH 计(PHSJ-3F)测定,TS、VTS、滤饼含水率、污泥沉降比(SV_{30})等,其中 SCOD 的测定方法为:取待测污泥混合液在转速为 4 500 r/min 下离心 40 min,离心液经 0.45 μm 滤膜过滤,测定该滤液中的 COD,其余各指标均采用标准测试方法^[24,25]。

2 实验结果与讨论

2.1 臭氧氧化时间对污泥的减量化效果

TS 和 VTS 常用来表征污泥中固相物质及污泥中挥发性固相物质的浓度,其变化直接反映了臭氧对污泥的氧化作用情况,是污泥减量化的体现。由于 MLTS 测量简便易行,所以在实际测定中,往往会把总固体浓度(MLTS)视为悬浮固体浓度(MLSS)。高桂梅等的实验测试研究表明^[26],在活性污泥中测定的 MLSS 占 MLTS 的比例,大约会在 87%~91% 之间,其实验样本中,悬浮物固体浓度最低时仅占到总固体浓度的 83.24%;MLVSS 占 MLVTS 的比例,大约在 90%~95% 之间。

臭氧氧化过程中,污泥 TS 的减少量占处理前污泥 TS 的百分率为 TS 的减少率,记为 $\Delta\text{TS}\%$; 污泥

VTS的减少量占处理前污泥VTS的百分率为VTS的减少率,记为 $\Delta VTS\%$ 。实验过程中,在最大臭氧投量4.8 g/h下,随着臭氧氧化时间的增加,污泥浓度(TS,VTS)的变化情况见图2,图3。

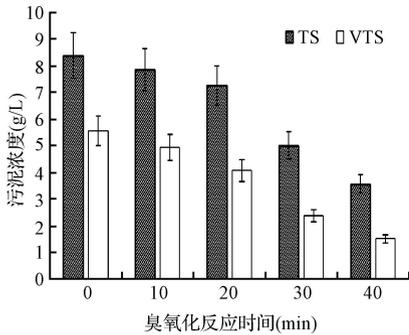


图2 臭氧化过程污泥浓度随时间的变化

Fig. 2 Variations of TS and VTS with ozonation time

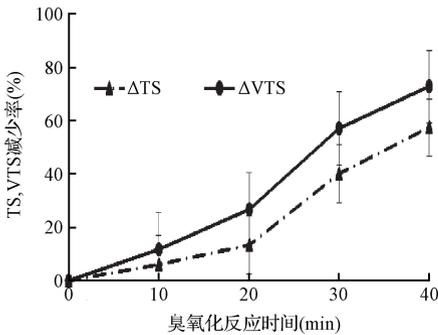


图3 臭氧化过程TS,VTS减少率随时间的变化曲线

Fig. 3 Variations of $\Delta TS\%$ and $\Delta VTS\%$ with ozonation time

从图2及图3可以看出,随着臭氧化反应时间的增加,污泥的TS和VTS逐步下降。当处理时间在20 min以下时,TS和VTS的减少量较少,其变化曲线斜率较小;10 min时, $\Delta TS\%$ 为6.08%, $\Delta VTS\%$ 为11.65%;20 min时, $\Delta TS\%$ 为13.49%,而 $\Delta VTS\%$ 为26.88%。此后,随着处理时间的增加,TS和VTS开始急速下降,TS和VTS的减少率呈线性增加,当处理时间上升到30 min时, $\Delta TS\%$ 和 $\Delta VTS\%$ 分别达到40.17%和57.17%;而当处理时间为40 min时, $\Delta TS\%$ 和 $\Delta VTS\%$ 的变化曲线斜率又恢复到20 min时的水平,TS和VTS的去除率分别为57.33%和72.76%。由此可见,在处理时间为30 min时,污泥固体物质量明显减少。

污泥在臭氧的作用下,其污泥浓度逐渐降低,TS从初始的8.39 g/L,降低到3.58 g/L;VTS从初始的5.58 g/L降低到1.52 g/L。污泥固体物质量的下降,主要是由于臭氧的强氧化性,通过直接和间

接的反应破坏污泥中微生物的细胞壁,使细胞质进入到污泥溶液中^[27]。同时,随着反应的进行,溶解在混合液中的部分有机物被氧化成二氧化碳和水^[28]。通过分析TS和VTS的下降数据,可以看出TS的降低基本是由于VTS的降低所引起的,二者的差值表明污泥中部分的无机物质也随着臭氧化而溶解了,最终使得污泥的固体物质量得到减量化。

2.2 臭氧氧化对污泥SCOD的影响

本次实验选用SCOD作为表征混合液中溶解性有机物含量的指标,通过观察臭氧氧化过程中SCOD的变化情况,分析臭氧对有机物的作用效果,同时将污泥臭氧破解后 $SCOD_t$ 与未破解 $SCOD_0$ 的差值与 $SCOD_0$ 的比值定义为SCOD的增加值($\Delta SCOD\%$),即: $\Delta SCOD\% = (SCOD_t - SCOD_0) / SCOD_0$ 。

从图4及图5可看出,随着处理时间的增加,SCOD及 $\Delta SCOD\%$ 总体呈上升趋势,SCOD值从处理前的3 501.24 mg/L上升到6 298.32 mg/L,增长率为79.88%。从0 min~30 min的处理时段内,SCOD增长迅速, $\Delta SCOD\%$ 斜率最大,SCOD在30 min时浓度达到5 320.32 mg/L;而后随着处理时间的增加,SCOD的浓度缓慢增加,其增长曲线趋于平

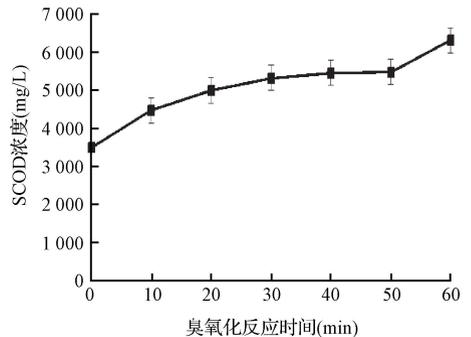


图4 臭氧化反应过程SCOD的变化曲线

Fig. 4 Variation of SCOD with ozonation time

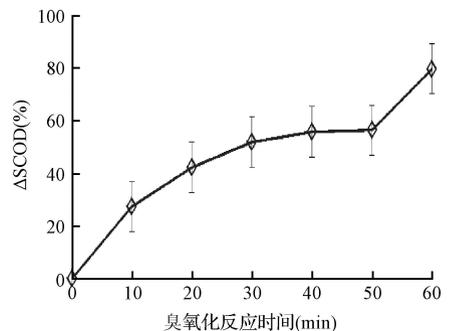


图5 臭氧化反应过程SCOD增加率的变化曲线

Fig. 5 Variation of $\Delta SCOD\%$ with ozonation time

衡,这一结论,与实验过程中 TS、VTS 的变化趋势一致,表明污泥被臭氧持续分解,但反应速度变慢。50~60 min 时,SCOD 值突然变大,可能是因为之前一些难以氧化的有机物已被臭氧逐渐氧化成小分子有机物,导致 SCOD 变大。

SCOD 的变化说明在臭氧化处理过程中,部分活性污泥微生物被杀死分解,臭氧破坏污泥中微生物的细胞壁,使得细胞中的物质被释放到混合液中,导致液相中溶解性有机物浓度升高。与此同时,臭氧对混合液中部分非溶解性的有机物进行氧化,使其溶解,表现为 SCOD 的迅速增加。

在臭氧化过程中可能有生物高聚物的溶出,如 Scheminski A. 等^[27]利用消化后的干污泥进行臭氧化实验,发现在臭氧的作用下,污泥被转变成可溶性的蛋白质、脂肪、多糖化合物进入到溶液中。

2.3 臭氧化对滤饼含水率的影响

污泥中的水分可以笼统地分成两类:易于脱除的自由水和采用一般机械方法难以去除的结合水。从微观上,也可将污泥中所含的水分细分成 4 种形态,即表面吸附水、间隙水、毛细结合水、内部结合水 4 部分^[30]。其中的空隙水因不与固体直接结合,故较容易分离;而表明吸附水及毛细结合水,用普通的浓缩或脱水方法均较难去除,须采用机械脱水进行分离;内部结合水则只有在细胞结构遭破坏时,才能渗出到外部液体中进行分离。

本实验测定了臭氧化处理对过滤后污泥滤饼含水率的影响,结果如图 6 所示。由图可知,污泥滤饼含水率随着处理时间的增加而降低,其下降过程大约可分为 3 个阶段:10 min 处理时间内,滤饼含水率下降较慢,对比处理前污泥,含水率仅下降 0.6%,这可能是因为臭氧首先与污泥胞外的有机物反应,并未释放出胞内物质,污泥的结合水下落较少,而含水率的下降主要是由于空隙水的分离形成;随后,随着处理时间的增加,在 10~40 min 时间内,滤饼含水率从 70.6% 下降到 66.6%,这主要是因为随着臭氧化时间的增加,污泥结构被破坏,微生物胞内物质被释放出来,污泥的毛细结合水与内部结合水下降,同时降低了污泥表面电荷密度,憎水性增加^[31,32];40 min 后,随着处理时间的增加,滤饼含水率下降减缓,降幅仅为 0.4%,推测其主要原因是因为污泥结合水分离到一定程度,很难再使其在数值上下降。

滤饼含水率的降低,从侧面印证了臭氧的投加,

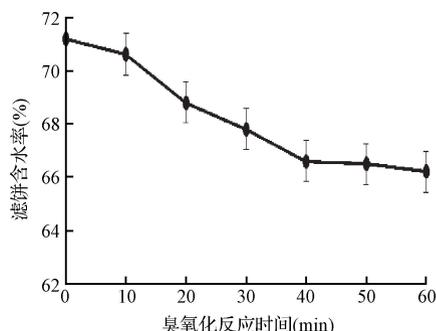


图 6 臭氧化过程滤饼含水率变化曲线

Fig. 6 Variation of sludge cake's water content with ozonation time

可使污泥絮体结构分散解体。臭氧攻击污泥絮体中的丝状菌,分散菌胶团,使污泥絮体内部的结合水被释放出来,增大污泥中易被脱除的水分比例。因此,本次实验结果表明,臭氧化处理可有效提高污泥的脱水性能。

2.4 臭氧化对污泥沉降性能的影响

图 7 显示不同臭氧化处理时间下,污泥混合液中固相体积的变化情况,从左到右依次为未处理原水、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min 和 60 min 的污泥样品,可以直观地看出随着氧化的进行,污泥固相体积逐渐减小,臭氧化污泥减量化效果显著。

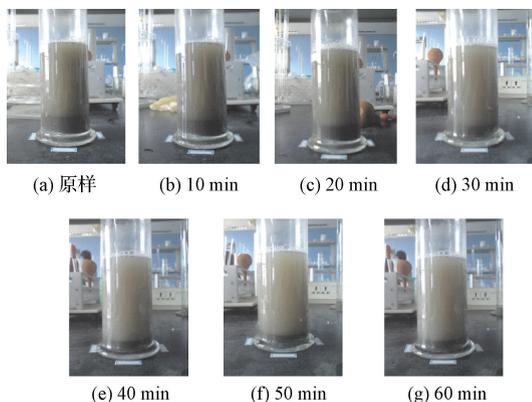
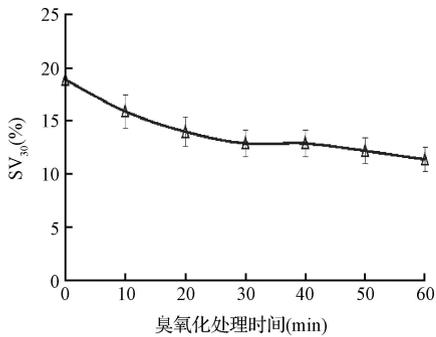


图 7 污泥固相体积随氧化时间的变化

Fig. 7 Variation of solid phase volume with ozonation time

污泥沉降比 SV_{30} 是表征污泥沉降性能的指标,指的是在 100 mL 量筒中,混合液经 30 min 静沉后,污泥体积与混合液的体积 (100 mL) 之比。 SV_{30} 能反映污泥的松散程度和絮凝、沉淀性能。

从图 8 可以看出,随着处理时间的增大, SV_{30} 逐渐下降: SV_{30} 从处理前的 18.9% 降至 11.4%,污泥的沉淀体积在 0~30 min 内迅速减小,降幅约为

图8 臭氧化过程 SV₃₀ 的变化曲线Fig. 8 Variation of SV₃₀ with ozonation time

4% ;30 min 后虽然继续变小,但变化速度与幅度均有所放缓。实验结果表明,臭氧化作用提高了污泥的沉降性能。

SV₃₀ 的减小,可归结于3方面的共同作用:(1)臭氧通过破坏丝状菌细胞,使菌丝的网络结构消失^[5]; (2)臭氧的投放使污泥中微生物细胞破裂,絮体及细胞内空隙水、毛细水、吸附水和结合水被释放出来,从侧面印证了滤饼含水率的变化情况。水分的脱出,使得污泥絮体的尺寸变小,密度提高,进而提高了污泥的沉降性能^[29]; (3)臭氧通过氧化作用使大分子有机物分解,将部分蛋白质和核酸溶解于水中,在使得 SCOD 增大的同时,也直接导致了固体沉淀量变小。

2.5 臭氧氧化对污泥显微结构的影响

显微镜检直观表征了污泥经臭氧、臭氧与酸解、碱解联合处理后絮体结构的变化。图9是污泥预处理前后的污泥絮体结构放大100倍的显微镜观察照片。污泥沉淀后,不溶物和溶解物会产生分离。因此在取样进行显微镜观察前,必须先将污泥搅拌均匀,使污泥菌胶团松散。从图中可以发现,污泥絮体结构在不同臭氧处理时间作用下,受到了不同程度的破坏。

由图9中的(a)可见,未处理的污泥颗粒较大,菌胶团呈致密紧凑的网状结构,间中可以观察到活动的微型动物,主要为纤毛虫、鞭毛虫等原声、后生动物,外观上未发现暴露的细胞;经过10 min的臭氧氧化处理后(b),剩余污泥的絮体结构开始解体,作为絮体结构骨架的丝状菌断裂,污泥原来紧密的絮凝结构被破坏,但丝状菌的密度仍然较高;30 min的臭氧处理后(c),污泥絮体的分离现象更加明显,污泥结构松散;而经过50 min处理后(d),污泥颗粒

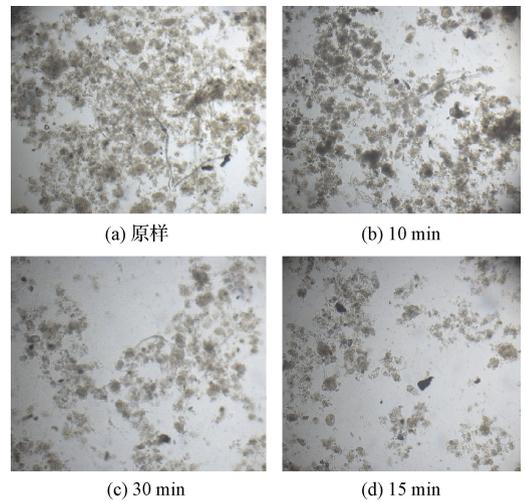


图9 不同处理时间下污泥的100倍显微镜照片

Fig. 9 Photomicrographs of sludge under different ozonation times (×100)

间相互缠绕的现象已观察不到,絮体结构逐渐分散解体,同时可以看到有部分细胞暴露在外,呈游离分布状态。

通过显微镜照片可以直观的看出,臭氧处理能有效地破坏污泥絮体,絮体颗粒变小、变分散絮凝程度降低;而随着臭氧氧化时间的增加,污泥絮体的断裂更加明显,臭氧通过破坏污泥微生物的细胞壁和细胞膜,使污泥絮体破碎,令原来包裹在污泥絮体内部的微生物丧失保护的屏障,完全暴露出来,使微生物细胞失活、死亡并溶解,从而达到污泥减量的效果。这一结果与前述的污泥浓度、SCOD 等变化结果一致,臭氧能有效破解污泥,使得 TS、VTS 下降,而 SCOD 则随处理时间的延长而增加。

3 结论

(1)随着氧化时间的增加,污泥 TS 和 VTS 逐步下降,处理40 min后,其去除率分别达到57.33%和72.76%,并且在30 min时,ΔTS%和ΔVTS%斜率最大,表明臭氧氧化能有效实现污泥减量化,臭氧通过直接和间接反应,破坏污泥中微生物的细胞壁,使胞内物质进入到污泥溶液中,因而污泥固体物质减少。在处理时间为30 min时,污泥固体质量下降幅度最大。

(2)SCOD 及 ΔSCOD% 总体呈上升趋势,通臭氧60 min后,SCOD 增长率达79.88%,30 min前 SCOD 呈线性增长,此后其增长曲线趋于平衡。SCOD 的变化表明进入混合液中的臭氧攻击微生物

细胞壁、细胞膜并使之破裂,细胞内的物质进入混合液中而导致 SCOD 含量的上升。

(3)滤饼含水率的变化过程大致可分为 3 个阶段:前 10 min 内下降较缓慢,推测可能是由于臭氧尚未破解微生物细胞,而主要与胞外的有机物反应;随后,在 10~40 min 内,滤饼含水率急剧下降,降幅达到 4%;40 min 后,滤饼含水率下降减缓,降幅仅为 0.4%。滤饼含水率的变化说明臭氧将污泥氧化分解,细胞内的水被释放出来,使得氧化的污泥滤饼含水率降低,提高了剩余污泥的脱水性能。

(4)经 30 min 沉淀后的污泥混合液固相体积随处理时间增加而逐渐减少,直观显示出臭氧对剩余污泥具有显著的减量效果。 SV_{30} 显著降低,在 60 min 处理时间内,降幅约为 7.3%;前 30 min 内, SV_{30} 迅速减小,30 min 后 SV_{30} 虽然继续变小,但变化速度与幅度均有所放缓。 SV_{30} 的变化从侧面印证了滤饼含水率及 SCOD 的变化,即臭氧的投放能使细胞破裂,释放出絮体及胞内的结合水、分解大分子有机物使其溶于液相中,导致污泥颗粒尺寸变小,密度提高,进而改善其沉降性能。

(5)从污泥处理后显微镜检可以发现,臭氧能够促进污泥絮体的裂解,使污泥絮体结构变得松散,大的菌胶团分散呈小团,并随着酸解时间的增大,污泥絮体结构进一步解体,获得良好的减量效果。

从本实验所获得的结果表明,单独利用臭氧对剩余污泥进行氧化处理,是可以获得良好的减量化效果的。

参考文献

- [1] Muller J. A. Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge. *Water Science and Technology*, **2001**, 44 (10): 121-128
- [2] Dziurla M. A., Salhi M., Leroy P., et al. Variations of respiratory activity and glutathione in activated sludge exposed to low ozone doses. *Water Research*, **2005**, 39 (12): 2591-2598
- [3] Nishimura F. Alternation and reduction characteristics of activated sludge by ozonation. *Advances in Asian Environmental Engineering*, **2001**, 1(1): 18-23
- [4] 赵玉鑫,尹军,于合龙,等. 污泥臭氧氧化破解影响因素研究. *吉林农业大学学报*, **2010**, 32(5): 523-527, 543
Zhao Yuxin, Yin Jun, Yu Helong, et al. Study on influencing factors of sludge ozonation. *Journal of Jilin Agricultural University*, **2010**, 32(5): 523-527, 543(in Chinese)
- [5] Kamiya T., Hirotsuji J. New combined system of biological process and intermittent ozonation for advanced wastewater treatment. *Water Science and Technology*, **1998**, 38 (8-9): 145, 147-153
- [6] 王琳,孙德栋. 臭氧氧化污泥的试验研究. *环境污染与防治*, **2005**, 2(2): 99-102
Wang Lin, Sun Dedong. Research on sludge ozonation. *Environmental Pollution & Control*, **2005**, 2(2): 99-102 (in Chinese)
- [7] Weemaes M., Grootaerd H., Simoens F., et al. Anaerobic digestion of ozonized biosolids. *Water Research*, **2000**, 34(8): 2330-2336
- [8] Saktaywin W., Tsuno H., Nagare H., et al. Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Research*, **2005**, 39 (5): 902-910
- [9] Egemen E., Corpening J., Padilla J., et al. Evaluation of ozonation and cryptic growth for biosolids management in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, **1999**, 39(10-11): 155-158
- [10] 曹艳晓,吴俊,冯晓西. 臭氧氧化剩余污泥的影响因素分析及应用初探. *给水排水*, **2010**, 36(1): 135-139
Cao Xiaoyan, Wu Jun, Feng Xiaoxi. Studies on influence factors for sludge ozonation. *Water and Wastewater Engineering*, **2010**, 36(1): 135-139(in Chinese)
- [11] Yasui H., Shibata M. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process. *Water Science and Technology*, **1994**, 30(9): 11-20
- [12] Yasui H., Nakamura K., Sakuma S., et al. A full-scale operation of a novel activated sludge process without sludge production. *Water Science and Technology*, **1996**, 34(3-4): 395-404
- [13] Sakai Y., Fukase T., Yasui H., et al. An activated sludge process without excess sludge production. *Water Science and Technology*, **1997**, 36(11): 163-170
- [14] 金瑞洪,Ng Wun Jern. 臭氧对活性污泥特性影响研究. *环境污染治理技术与设备*, **2004**, 5(9): 48-50
Jin Ruihong, Ng Wun Jern. Effects of ozone on characteristics activated sludge. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, **2004**, 5(9): 48-50 (in Chinese)
- [15] 孙德栋,王琳,黄海萍. 污泥减量过程中臭氧氧化对硝化和反硝化的试验研究. *环境污染与防治*, **2006**, 28 (3): 187-190
Sun Dedong, Wang Lin, Huang Haiping. Effect of sludge ozonation on nitrification and denitrification in the course of sludge reduction. *Environmental Pollution & Control*,

- 2006**, 28(3):187-190(in Chinese)
- [16] Dytczak M. A. , Londry K. L. , Siegrist H. , et al. Ozonation reduces sludge production and improves denitrification. *Water Research*, **2007**, 41(3): 543-550
- [17] Cui R. , Jahng D. Nitrogen control in A/O process with recirculation of solubilized excess sludge. *Water Research*, **2004**, 38(5): 1159-1172
- [18] Song K. G. , Choung Y. K. , Ahn K. H. , et al. Performance of membrane bioreactor system with sludge ozonation process for minimization of excess sludge production. *Desalination*, **2003**, 157(1-3): 353-359
- [19] Oh Y. K. , Lee K. R. , Ko K. B. , et al. Effects of chemical sludge disintegration on the performances of wastewater treatment by membrane bioreactor. *Water Research*, **2007**, 41(12): 2665-2671
- [20] 王丽,王琳,王宝贞. 污泥臭氧减量对淹没式生物膜工艺运行效能的影响. *现代化工*, **2007**, 27(1): 36-39
Wang Li, Wang Lin, Wang Baozhen. Influence of sludge ozonation reduction on submerged biofilter performance efficacy. *Modern Chemical Industry*, **2007**, 27(1): 36-39 (in Chinese)
- [21] 何赞,王海燕,田华菡,等. 臭氧化对臭氧耦合 ASBR/SBR 工艺硝化、反硝化的影响. *中国给水排水*, **2010**, 26(9):33-36
He Zan, Wang Haiyan, Tian Huahan, et al. Influence of ozonation on nitrification and denitrification in combined process of ozonation and ASBR/SBR. *China Water and Wastewater*, **2010**, 26(9): 33-36(in Chinese)
- [22] 王正. 污泥臭氧化影响因素及组合工艺污泥减量化效果研究. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文, **2008**. 24-25
Wang Zheng. Studies on influence factors for sludge ozonation and sludge reduction performance of combined processes. Harbin: Doctor Dissertation of Harbin Institute of Technology, **2008**. 24-25(in Chinese)
- [23] 梁立伟,郭桂悦,陈福霞,宋春艳,梁忠越. 污泥停留时间对污泥减量化的影响. *油气田环境保护*, **2008**, 18(1):33-35
Liang Liwei, Guo Guiyue, Chen Fuxia, et al. Influence of sludge residence time on sludge reduction. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, **2008**, 18(1): 33-35(in Chinese)
- [24] 城市污水处理厂污泥检验方法 CJ/T221-2005. 北京:中国标准出版社, **2005**. 2-3
- [25] 国家环境保护总局. 水与废水监测方法手册(第4版). 北京:中国环境科学出版社, **2002**. 105-107, 211-213
- [26] 高桂梅. 活性污泥工艺曝气池混合液中悬浮固体浓度与总固体浓度差异的研究. *环境科学导刊*, **2010**, 29(6): 5-6
Gao Guimei. Studies on the differences between the concentrations of mixed liquor suspended solids and total solids. *Environmental Science Survey*, **2010**, 29(6): 5-6 (in Chinese)
- [27] Scheminski A. , Krull R. , Hempel D. C. Oxidative treatment of digested sewage sludge with ozone. *Water Science and Technology*, **2000**, 42(9): 151-158
- [28] Yu Liu. Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process. *Chemosphere*, **2003**, 50(1): 1-7
- [29] Bohler M. , Siegrist H. Partial ozonation of activated sludge to reduce excess sludge, improve denitrification and control scumming and bulking. *Water Science and Technology*, **2004**, 49(10): 41-49
- [30] 赵庆祥. 污泥资源化技术. 北京:化学工业出版社, **2002**. 10-11
- [31] Park K. Y. , Ahn K. H. , Maeng S. K. , et al. Feasibility of sludge ozonation for stabilization and conditioning. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, **2003**, 25(1): 73-80
- [32] Pere J. , Alen R. , Viikari L. , et al. Characterization and dewatering of activated sludge from the pulp and paper industry. *Water Science and Technology*, **1993**, 28(1): 193-201